



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE GRADO

Implementación de una Raspberry Pi como agregador eléctrico en una red de electrolineras

*Valentina Cano Murillo
Felipe Moreno Viveros*

Director: Ph.D Alejandro GARCÉS
Co-director: Ms.C Arley BEJARANO

Noviembre de 2019

Agradecimientos

"Quiero agradecer a Dios por guiar siempre mi camino, a mis padres Luz y Francisco por demostrarme que el amor nos hace grandes, a mis amigos Daniela, Juan y Camilo por haber hecho de esta etapa de mi vida algo tan importante y a Felipe, por darme el ánimo necesario cada día para culminar este trabajo."

Valen.

"Agradezco a mi madre Jota por creer, a mi padre por su método de enseñanza, a mi hermana Valentina por su convicción, a mi hermano Christian por su astucia y a mi compañera en este proyecto, Valentina, por atreverse a confiar"

Felipe.

Tabla de contenido

1	Introducción	4
1.1	Definición del problema	4
1.2	Justificación	5
1.3	Objetivos	6
1.3.1	Objetivo general	6
1.3.2	Objetivos específicos	6
1.4	Estado del arte	6
1.5	Contribuciones	7
1.6	Organización del documento.	7
2	Agregadores de vehículos eléctricos.	8
2.1	Vehículos eléctricos.	8
2.1.1	Tipos de vehículos	9
2.2	Estaciones de carga	11
2.3	Agregadores	11
2.4	Raspberry Pi	13
3	Modelo de optimización.	15
3.1	Función Objetivo	15
3.2	Restricciones	16
4	Implementación	17
4.1	Escenario ideal	19
4.2	Escenario real	20
5	Resultados	23
5.1	Resultados para escenario ideal	24
5.2	Resultados para escenario real	24
6	Conclusiones y futuros trabajos	29
6.1	Conclusiones	29
6.1.1	Para el escenario ideal	29
6.1.2	Para el escenario real	29
6.2	Futuros trabajos	30

7 Anexos	31
7.1 Código del modelo de optimización	31
Apendices	32

Capítulo 1

Introducción

1.1 Definición del problema

En las primeras dos décadas del siglo XXI los temas relacionados con ahorrar energía, preservar el medio ambiente, aprovechar y usar de manera adecuada los recursos naturales, han tomado cada vez más fuerza. Se han implementado nuevas estrategias que permiten incentivar el ahorro en el usuario y que reflejan una mejora en el uso de los recursos ambientales y económicos.

Una de las tendencias es migrar del vehículo convencional al vehículo eléctrico. Esto implica pensar en todo lo que se necesita para un funcionamiento efectivo y eficiente, teniendo en cuenta una alta confiabilidad, de forma que mejore la calidad de vida del usuario y se satisfaga la demanda requerida por él.

Se puede apreciar que en espacios públicos como parqueaderos y centros comerciales se están preparando para recibir estas nuevas tecnologías, que cada día serán más comunes, y están instalando electrolinerías o puntos de carga para que el vehículo eléctrico pueda recargarse en este sitio mientras el usuario está realizando otra actividad.

Una red de electrolinerías se constituye por un número determinado de estaciones de carga, pero no existe un mando centralizado que defina a un actor principal a la hora de tomar decisiones en cuanto al cómo proveer carga al usuario. Tener un espacio que contenga varios puntos de carga para vehículos eléctricos permite la autonomía de sus usuarios, en cuanto al cubrimiento de la demanda de energía, para usar su vehículo el tiempo que sea necesario sin preocuparse porque el porcentaje de la batería no le sea suficiente.

Esas estaciones de carga deben ir todas conectadas a un agregador eléctrico, un dispositivo conectado al transformador que permite gestionar recursos energéticos y tomar decisiones en cuanto al cómo entregar la energía que le es demandada. Para la toma de decisiones se hace necesario implementar un modelo de optimización que determine un orden prioritario, de acuerdo a la función objetivo y las restricciones, para la correcta activación de los puntos de carga.

El modelo de optimización, la interfaz y todo lo que acarrea la conexión

de la electrolinera, el agregador y el transformador, debe ir contenido en un dispositivo confiable y eficiente, en este caso ese dispositivo es un Raspberry Pi modelo 3B+

Habiendo identificado las tendencias y los factores que pueden presentar retos para la inclusión de vehículos eléctricos a la red de Colombia, se plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo implementar algoritmos para optimizar una electrolinera con capacidad para cinco (5) usuarios que requieran diferentes tipos de servicios?

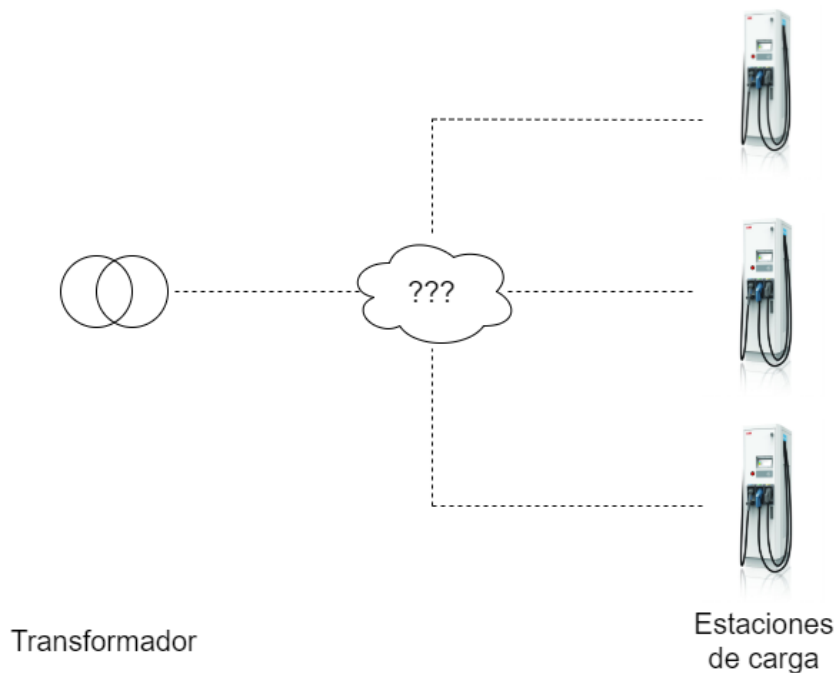


Figura 1.1: Posición del agregador eléctrico en la cadena de recarga del vehículo eléctrico

1.2 Justificación

En la transición energética a la que se está enfrentando la población, es importante preparar su entorno con el objetivo de mejorar su calidad de vida y para esto, en el campo de los vehículos eléctricos, se debe garantizar que el vehículo va a cumplir con la demanda de energía que su propietario requiere, es por esto que las estaciones de carga dentro de la ciudad y en los corredores viales son de vital importancia, ya que así se puede asegurar que el usuario siempre tendrá cerca un lugar donde recargar su batería y continuar con su trayecto sin ningún contratiempo o en el caso de la ciudad podrá llegar a un parqueadero, dejar su

vehículo cargando según un modelo de carga específico, realizar otras actividades y al regresar al parqueadero, su vehículo tendrá la autonomía energética para llegar a su hogar.

Implementar un mando centralizado en una red de puntos de carga, también llamada electrolinera, permite gestionar de manera eficiente la energía que es demandada por cada punto, de manera que no sature el transformador y optimice el proceso de recarga de las baterías en aras a cumplir con la función objetivo que tiene planteada en su modelo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Implementar en una Raspberry Pi el control de carga de un agregador asociado a una red de electrolineras.

1.3.2 Objetivos específicos

- A. Comprender el funcionamiento de una Raspberry pi e implementarla en un proceso de optimización de carga.
- B. Construir una función objetivo que permita la carga del vehículo eléctrico y genere los mayores beneficios para la electrolinera.
- C. Diseñar una interfaz gráfica que simule las electrolineras y pueda suministrar al sistema los datos necesarios para la carga del vehículo.
- D. Establecer la comunicación entre la Raspberry Pi y la red de electrolineras.
- E. Reportar resultados obtenidos de la simulación de la electrolinera ante diferentes situaciones de carga.

1.4 Estado del arte

En [1] se plantea una estrategia de despacho óptimo de un agregador de vehículos eléctricos a la red, con el objetivo de satisfacer la demanda del vehículo eléctrico y maximizar los beneficios económicos obtenidos por el agregador, teniendo en cuenta el estado de carga de la batería del vehículo y la distancia recorrida diariamente.

En [2] consideran los vehículos eléctricos como pequeños generadores distribuidos que traen consigo beneficios para el usuario, además de hacer que la red sea eficiente y robusta. Este artículo revisa la tecnología del vehículo eléctrico, la conectividad, el impacto y los requerimientos necesarios para garantizar la mejor eficiencia posible y la operación económica del vehículo contando con los recursos del internet de la energía (IoE), analiza los sistemas de carga

actuales, herramientas de software para el diseño de cargas inteligentes, retos y posibles soluciones.

En [3] se presenta un método para determinar la capacidad óptima de la estación de carga de un vehículo eléctrico en el área donde pretende situarse y la diferencia entre los coeficientes empleados para calcular el costo de la estación de carga. Plantea una función objetivo que busca minimizar el costo de las inversiones fijas, operación y mantenimiento de la estación de carga y los alimentadores, concluye con la muestra de resultados positivos para la factibilidad y efectividad del modelo propuesto.

En [4] considera el agregador del vehículo eléctrico como un recurso para responder a la demanda a través de la carga y descarga del vehículo y de acuerdo a la variación del precio de la electricidad. Busca desarrollar y examinar un algoritmo de optimización heurística para determinar el tamaño óptimo del sistema híbrido (mezcla de energía solar fotovoltaica, baterías y diésel) considerando el punto de carga del vehículo eléctrico como una carga controlable, como resultado se evidencia que la utilización del punto de carga reduce el costo total del sistema híbrido.

1.5 Contribuciones

Dentro de los aportes realizados en este trabajo de investigación se encuentra: el modelo de optimización, con su respectiva función objetivo y sus restricciones, que sí bien es un modelo sencillo, satisface las necesidades de las problemáticas que se pretenden resolver en cuanto a la gestión energética; un código en Python que integra la potencia disponible en el transformador, la operación del agregador y la interfaz que permitirá la interacción entre el usuario y el dispositivo; y una implementación física que permite visualizar un prototipo de cómo sería el funcionamiento del dispositivo si se llega a recrear en tamaño real.

1.6 Organización del documento.

Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera: en el capítulo 1 encontrará la introducción al tema a investigar y la problemática que se pretende solucionar, en el capítulo 2 se explicarán términos empleados a lo largo del desarrollo del trabajo, para mejor comprensión de lo que se hizo, en el capítulo 3 se explica el modelo de optimización que se implementó con su función objetiva y restricciones, en el capítulo 4 se explica la implementación que se realizó de manera física y los escenarios que se contemplaron para recrear la solución al problema, en el capítulo 5 se encuentran los resultados obtenidos de la investigación y en el capítulo 6 encontrará las conclusiones y las recomendaciones para futuros trabajos.

Capítulo 2

Agregadores de vehículos eléctricos.

Para comprender el desarrollo de este trabajo de investigación es importante introducir conceptos que ayuden en el proceso de interpretación, así el lenguaje empleado en lo próximos capítulos le resultará familiar.

2.1 Vehículos eléctricos.

Un vehículo eléctrico es un medio de transporte que utiliza un motor eléctrico para su propulsión, usando energía eléctrica que almacena en baterías. Hasta diciembre de 2018 existían en el mundo 5.3 millones de vehículos eléctricos en uso, entre puros e híbridos. [5]

Según [6], Colombia en el 2018 se ubicó en el primer puesto entre los países de la región, donde se venden vehículos eléctricos, seguido de México, Chile y Ecuador. Hasta julio de 2019, según la Asociación Nacional de Movilidad Sostenible, las ventas han incrementado un 154%

El Gobierno colombiano, para incentivar la adquisición de este tipo de vehículos, en el decreto 1116 de 2017 [7] y la ley 1964 de 2019 [8], otorga beneficios como:

- Reducción al 5% del arancel para vehículos híbridos
- Reducción al 0% del arancel para vehículos eléctricos
- Reducción al 0% del arancel para sistemas de cargas eléctricas
- Reducción al 5% del arancel para vehículos híbridos
- La tarifa aplicable a un vehículo eléctrico no debe exceder el 1% del valor comercial del mismo

-
- Descuento sobre la revisión tecnicomecánica
 - Descuento del 10% en el SOAT
 - Descuento en el impuesto vehicular
 - Tarifas y plazas diferenciales en parqueaderos
 - Estarán excentos de pico y placa, día sin carro, entre otros.

2.1.1 Tipos de vehículos

En la actualidad, hablando de vehículos eléctricos se puede encontrar desde patinetas hasta camiones y trenes, pero para efectos de este trabajo de investigación, cuyo enfoque se ubica en lo local, se habla de bicicletas, motocicletas y automóviles.

Bicicletas

Según [9], los parámetros típicos asociados a las bicicletas eléctricas se muestran en la tabla 2.1.



Figura 2.1: Bicicleta eléctrica

Tabla 2.1: Parámetros asociados a las bicicletas

Tipo de vehículo	Bicicletas
Motor	350 W
Peso	20 kg aprox
Autonomía	40 km +/-10
Costo recarga	menos de \$5000 al mes
Velocidad	25 km/h

Motocicletas

Según [9], las motocicletas eléctricas cuentan, en promedio, con las características mencionadas en la tabla 2.2



Figura 2.2: Moto eléctrica

Tabla 2.2: Parámetros asociados a las motocicletas

Tipo de vehículo	Motocicletas
Motor	1200 W
Peso	120 kg aprox
Autonomía	45 km +/-10
Costo recarga	menos de \$10000 al mes
Velocidad	45 km/h

Vehículos

Los vehículos eléctricos cuentan, en promedio, con las características mencionadas en la tabla 2.3 [10] [11]:

Tabla 2.3: Parámetros asociados a los vehículos

Tipo de vehículo	Vehículo
Motor	110 kW
Peso	1.8 toneladas aprox
Autonomía	300 km +/-10
Costo recarga	menos de \$50000 al mes
Velocidad	100 km/h



Figura 2.3: Vehículo eléctrico

2.2 Estaciones de carga

La estación de carga es el punto donde el vehículo eléctrico, sin importar su naturaleza (bicicleta, moto o carro), se conecta a la red para recargar su batería.

Según [12], la carga que entrega la electrolinera se divide en dos tipos: convencional y rápida.

La carga convencional se caracteriza por trabajar a 16 amperios y 220 voltios. Alcanza el 80% de la batería aproximadamente en 1 hora con 30 minutos y el 100% de la carga en 2 horas con 20 minutos.

La carga rápida se caracteriza por trabajar a una corriente de 32 amperios y una tensión de 440 voltios. Alcanza el 80% de la batería en 20 minutos aproximadamente y el 100% de la carga en 40 minutos.

En Colombia, la movilidad eléctrica es un aspecto que ha tomado fuerza y por tal razón se han implementado puntos de carga pequeños, en los parqueaderos de los centros comerciales y de universidades. En una escala mayor existen las electrolineras que son puntos de carga, como las gasolineras o estaciones de servicio tradicionales, donde hay varios puntos de recarga. En la ciudad de Pereira se inauguró en el 2018 la primera electrolinera que durante los primeros meses de funcionamiento entregó de manera gratuita energía a sus usuarios.[13]

2.3 Agregadores

Un agregador eléctrico es un actor del sistema que permite tomar decisiones a cerca de la carga que es entregada a los vehículos eléctricos que se conecten a la electrolinera, teniendo en cuenta el tipo de carga que este requiera, la cargabilidad del transformador que alimenta el punto de carga y buscando maximizar las utilidades para la empresa.



Figura 2.4: Electrolinera ubicada en la ciudad de Pereira

Dicho dispositivo se conecta al transformador de distribución y a su vez a los puntos de carga de la electrolinera para tener comunicación con ambas partes. Está en capacidad de gestionar recursos energéticos, de acuerdo al modelo de optimización que tenga programado, tiene comunicación aguas arriba y aguas abajo de él, por lo que puede transmitir información a otros dispositivos por encima de él, y debe cumplir con características como robustez, confiabilidad y eficiencia.

El agregador se convierte en un intermediario entre el operador de la red y los vehículos eléctricos ya que está en la capacidad de participar en el mercado de oferta y demanda porque puede tomar decisiones. Además al referirse en específico a un agregador de vehículos eléctricos, este puede brindar otros servicios de tipo técnico como una reserva de funcionamiento o carga controlable[14]. Es importante mencionar que un agregador también puede trabajar de manera bidireccional tomando o inyectando energía a la red pero para este proyecto se plantea un agregador unidireccional que únicamente toma energía de la red para entregarla en los puntos de recarga.

Una ventaja de tener un dispositivo como este es que evita o al menos disminuye, las congestiones en los alimentadores debido a la demanda masiva de activación de puntos de carga y las pérdidas[14]. Actualmente existen empresas como Coulomb Technologies que tienen estaciones de carga de vehículos eléctricos con medición inteligente y gestión de la carga.

Para que el agregador realice de manera correcta la gestión técnica, es importante que conozca ciertos datos (a través de un medidor inteligente) de los usuarios que se conectan a los puntos de carga. Estos datos se pueden clasificar en fijos y dinámicos[14], dentro de los fijos tenemos: nivel de batería, capacidad de potencia de las conexiones y el cargador, nivel de carga normal y la duración de la batería; y en los datos dinámicos está el precio del kW/h y tiempo de la recarga.

Este dispositivo se encuentra en la capacidad de clasificar a los usuarios de

la siguiente manera[14]:

- Tipo 1: carga incontrolable. Usuarios que usan mucho su vehículo para viajar, que conectan el vehículo en estaciones de carga y solo les interesa recargar su batería.
- Tipo 2: carga parcialmente controlable. Usuarios con ubicación y hora de carga conocidas.
- Tipo 3: carga controlable. Usuarios con ubicación y hora de carga conocidas, además de también conocer la tasa de carga.
- Tipo 4: recurso controlable. Usuarios de tipo 3 con tecnología V2G para permitir que el agregador puede tomar energía de la batería del vehículo para agregarla a la red en caso de ser necesario.

En el desarrollo de este trabajo de investigación los usuarios que acceden a la electrolinera son tipo 1.

2.4 Raspberry Pi

Se podría pensar que un agregador que se comporta como un mando centralizado, debe ir implementado en una máquina robusta con capacidad para soportar todo el proceso que va detrás de la toma de alguna decisión, pero mientras se construía el código en Python, se encontró que existe un elemento pequeño en cuanto a tamaño pero útil y poderoso en cuanto a su capacidad, este elemento se llama Raspberry Pi.



Figura 2.5: Raspberry Pi modelo 3B +

La primera versión de una Raspberry Pi fue presentada en el 2006 como un micro-controlador. En 2012, Raspberry Pi Foundation la sacó al mercado como

un micro-computador, con micro procesador, puerto USB, 512 MB de RAM y un compartimento para una tarjeta SD que contuviera el sistema operativo. A partir de allí se han realizado modificaciones a todas las versiones que presentan y la más reciente es la Raspberry Pi 3 Model B+ que entre sus muchas características tiene Bluetooth 4.2, Wi-Fi, 1 GB de RAM y una serie de puertos GPIO. [15]

Los puertos GPIO son usados para controlar entradas o salidas de propósito general, esta versión cuenta con 40 pines [16] y adicional, en este proyecto, se emplea un conector que permite usar los puertos GPIO en una protoboard para conectar allí las salidas del script de Python, que vienen siendo leds. En la figura 2.6 A se observan los puertos GPIO y en la figura 2.6 B se muestra el extensor empleado a la hora de implementar el circuito.

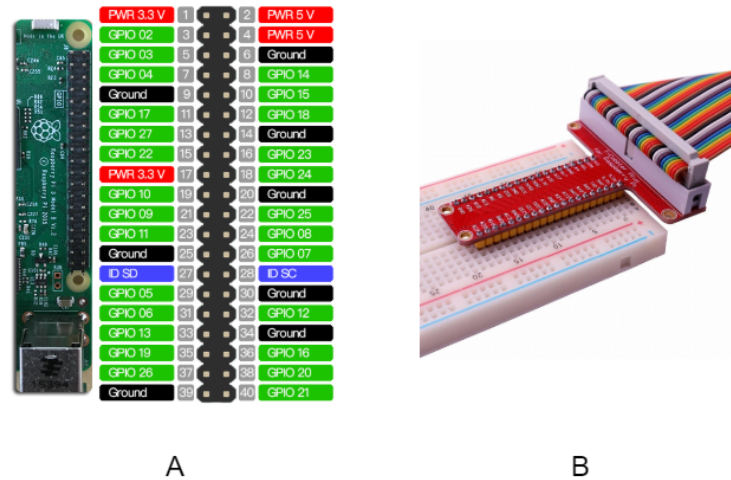


Figura 2.6: A. Puertos GPIO de la Raspberry Pi. B. Extensor de puertos GPIO.

Capítulo 3

Modelo de optimización.

Un modelo de optimización pretende encontrar la mejor manera para realizar una operación minimizando o maximizando una función objetivo.

Un problema de optimización se compone generalmente de una función objetivo, que es una medida cualitativa de cómo funciona el sistema que se pretende minimizar o maximizar, variables que representan las decisiones que afectan el resultado del problema y unas restricciones que son condiciones que se deben satisfacer obligatoriamente [17]. Los métodos de optimización se pueden clasificar en métodos clásicos y metaheurísticos. Se puede resumir, diciendo que los métodos clásicos garantizan un óptimo local mientras que los metaheurísticos encuentran un punto de buena calidad (pero no el óptimo) y el tiempo que toman para alcanzar dicho punto es incierto. [18]

En este caso se pretende maximizar los ingresos por el pago de la energía entregada en los puntos de carga de la electrolinera, con sus respectivas restricciones en cuanto a potencia y energía.

3.1 Función Objetivo

En la ecuación 3.1 se expresa la función objetivo del modelo optimización, donde se desea maximizar los ingresos de la electrolinera. En esta ecuación, ΔT es el intervalo de tiempo en el que se da la toma de datos, C_k es el costo del kW/h que va a variar según el tipo de carga que entregue el punto y P_k es la potencia demandada por cada punto de carga.

$$\max \Delta T \sum_{k=1}^n C_k P_k \quad (3.1)$$

3.2 Restricciones

En la ecuación 3.2 se considera que la potencia total del transformador $P_{trafo}(t)$ será mayor o igual a la suma de la potencia demandada por la carga externa P_C y las potencias demandadas por cada punto de carga P_k . El termino j_k es un factor binario que será un 1 cuando el punto esté activo y 0 cuando no lo esté.

$$\sum_{k=1}^n P_k j_k + P_C \leq P_{trafo}(t) \quad (3.2)$$

La ecuación 5.3 explica que todos los puntos de consumo, incluyendo la carga externa tendrán una potencia igual o mayor a cero. Esto con el objetivo de que las respuestas obtenidas después de aplicar el modelo de optimización, sean respuestas lógicas, pues en este trabajo en específico se está absorbiendo energía de la red y tener valores de potencia negativos significará que la potencia está siendo entregada a la red.

$$P_1, P_2, \dots, P_n, P_C \geq 0kW \quad (3.3)$$

Para resolver este problema de optimización se usa en Python el paquete CVXPY que está diseñado para problemas de optimización convexa para facilitar la escritura del modelo. [19] Las opciones de solucionadores o solvers [20] que usa este paquete se encuentran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Solvers incluidos en librería CVXPY

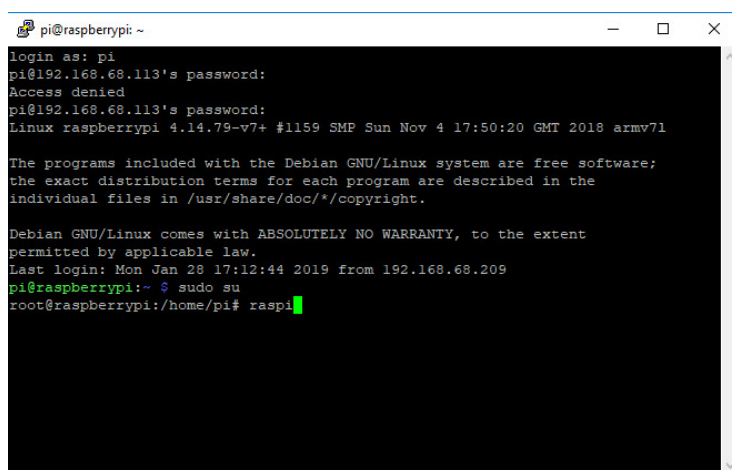
SOLVER	LP	QP	SOC	SDP	EXP	MIP
CBC	X					X
GLPK	X					
GLPK_MI	X					X
OSQP	X	X				
CPLEX	X	X	X			X
NAG	X	X	X			
ELEMENTAL	X	X	X			
ECOS	X	X	X		X	
ECOS_BB	X	X	X		X	X
GUROBI	X	X	X			X
MOSEK	X	X	X	X		
CVXOPT	X	X	X	X		
SCS	X	X	X	X	X	

El solver empleado para resolver este modelo de optimización es ECOS_BB debido a la similitud entre los tipos de datos de entrada que necesita y los que se tiene en el planteamiento del modelo. ECOS_BB está diseñado para resolver problemas simples a velocidades aceptables y con una complejidad de código mínima. [21]

Capítulo 4

Implementación

Para emplear la Raspberry Pi como agregador y poder ejecutar en ella el código creado para la operación de la electrolinera, la toma de decisiones y el proceso de automatización, se debe hacer una configuración de la Raspberry en donde se instala un sistema operativo llamado Raspbian, de distribución libre para ser empleado en Raspberry, se obtiene la dirección ip de la Raspberry y se activa la opción VNC a través de “interfacing option”.



```
pi@raspberrypi: ~  
login as: pi  
pi@192.168.68.113's password:  
Access denied  
pi@192.168.68.113's password:  
Linux raspberrypi 4.14.79-v7+ #1159 SMP Sun Nov 4 17:50:20 GMT 2018 armv7l  
  
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;  
the exact distribution terms for each program are described in the  
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.  
  
Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent  
permitted by applicable law.  
Last login: Mon Jan 28 17:12:44 2019 from 192.168.68.209  
pi@raspberrypi:~$ sudo su  
root@raspberrypi:/home/pi# raspi
```

Figura 4.1: Dirección ip de la Raspberry Pi.

Posteriormente se descarga el software “Real VNC” en otro computador que debe estar conectado a la misma red de internet (por cable) que la Raspberry. En dicho software se ingresa la dirección ip del dispositivo y a partir de ese momento se puede tener acceso al equipo a través del escritorio remoto, cabe resaltar que de esta manera a través de un computador con un sistema operativo diferente a Linux (que es el sistema operativo nativo de la Raspberry Pi) se

puede acceder sin mayor inconveniente a la Raspberry y hacer uso de todas sus herramientas, como por ejemplo el editor de texto y el compilador de Python que trae de fábrica.

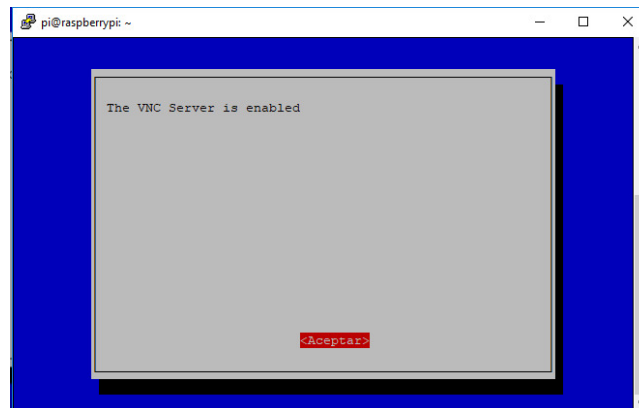


Figura 4.2: Activación VNC

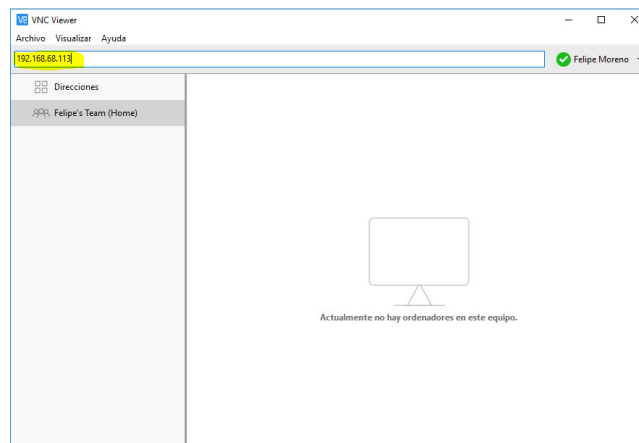


Figura 4.3: Acceso a escritorio remoto

Después de hablar del procedimiento que se hizo con la Raspberry, se muestra en la figura 4.4 el montaje que se hizo con leds, un expansor de los puertos GPIO y unas resistencias para proteger los leds.

4.1 Escenario ideal

Después de haber configurado la Raspberry y de haber construido un primer código para simular el agregador eléctrico, el primer escenario que se considera es el ideal, que viene siendo el siguiente:

Un agregador está ubicado en el parqueadero principal de la Universidad Tecnológica de Pereira, cuenta con 5 puntos de carga (2 de carga rápida y 3 de carga convencional). Los puntos de carga rápida alimentarán carros y los puntos de carga convencional alimentarán bicicletas y motos.

El término “ideal” se refiere a que el agregador siempre podrá entregar toda la energía que le es demandada sin tener ninguna restricción y la única condición para empezar a suministrar energía al vehículo será que el usuario acepte el costo de la recarga.

Entonces este programa se comporta de la siguiente manera: al empezar a correr el código, salen en pantalla los 5 puntos de carga, se le solicita a cada usuario que habiendo escogido la estación de carga adecuada para su vehículo digite en pantalla el porcentaje de carga con el cual ingresa, después el programa calcula el tiempo y el costo de la recarga y le pregunta al usuario si desea aceptarla, cuando este la acepta se enciende un led que significa que el punto de carga empezó a entregar energía y cuando la recarga termina el led se apaga automáticamente. Cabe resaltar que mientras alguno de los puntos esté en uso, los otros pueden ser activados sin ningún problema.

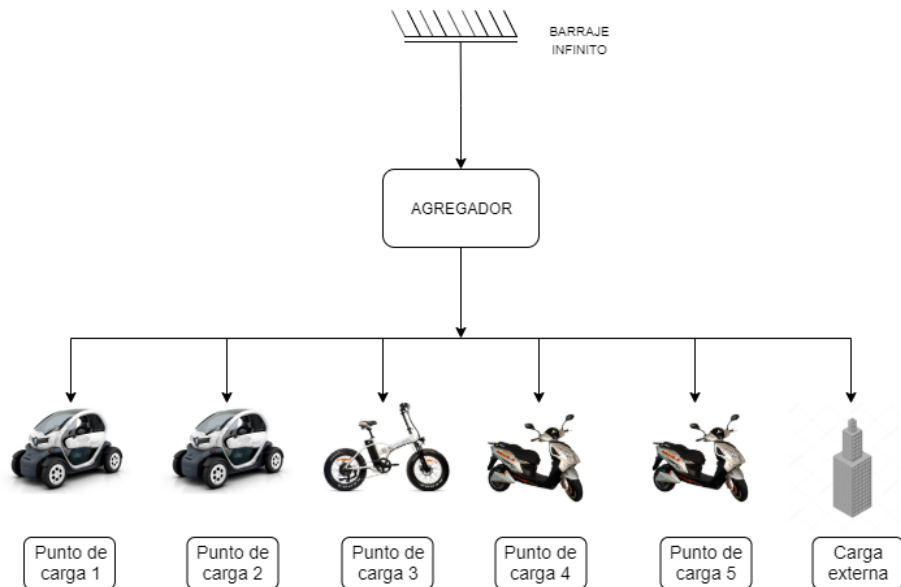


Figura 4.5: Escenario ideal

4.2 Escenario real

Habiendo hecho un modelo ideal donde la demanda se satisface siempre, se va a considerar un modelo real donde se cuenta con restricciones y limitaciones, así:

Se cuenta con una base de datos donde se encuentra una serie de escenarios aleatorios de la cargabilidad de la electrolinera, en una combinación de 1 y 0, donde 1 significa la activación del punto de carga y 0 significa que el punto no está entregando carga. La potencia que consume un punto de carga rápida y uno de carga convencional es un valor constante, entonces a medida que los puntos de carga y los respectivos led se activan, el código va sumando las potencias con la demanda de la carga externa. (Como ejemplo ilustrativo se cuenta con la figura 4.6)

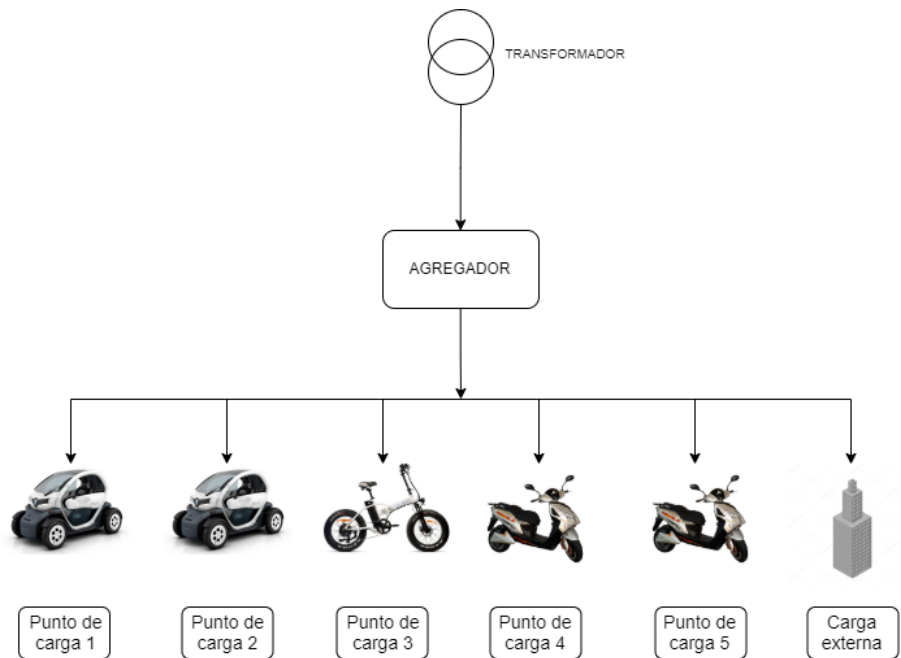


Figura 4.6: Escenario real

Por ejemplo: asumiendo una demanda externa de 30 kW, quedan disponibles 20 kW para la electrolinera y con esta potencia disponible se puede entregar demanda a dos puntos de carga rápida (que consumen un total de 14.9 kW) y un punto de carga convencional (que consume 3.22 kW). Si se suman las potencias consumidas por los tres puntos que se activan, se tendrá un total de 18.12 kW, un valor menor a 20 kW pero que no es suficiente para activar un cuarto punto de carga.

La curva que representa la demanda de la carga externa de lunes a sábado,

en un horario de 6:00 am a 10:00 pm se muestra en la figura 4.7. Dicha curva está discretizada en intervalos de 20 minutos. Se puede observar que las horas pico ocurren al rededor del medio día y de las 7:00 pm que es el momento donde se presenta gran flujo de usuarios del parqueadero.

El valor obtenido de esta medición será empleado en el modelo de optimización del escenario real como parte de las restricciones con el objetivo de dar prioridad a satisfacer esta demanda antes que los puntos de carga.

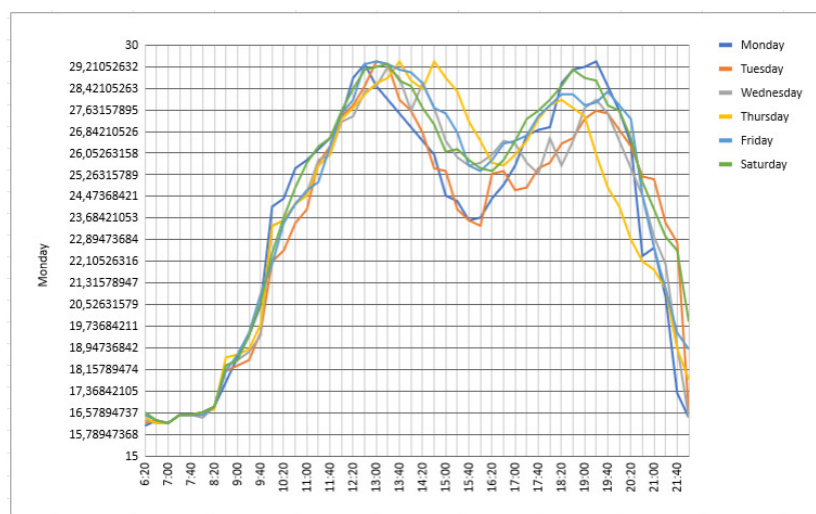


Figura 4.7: Curva de carga del transformador

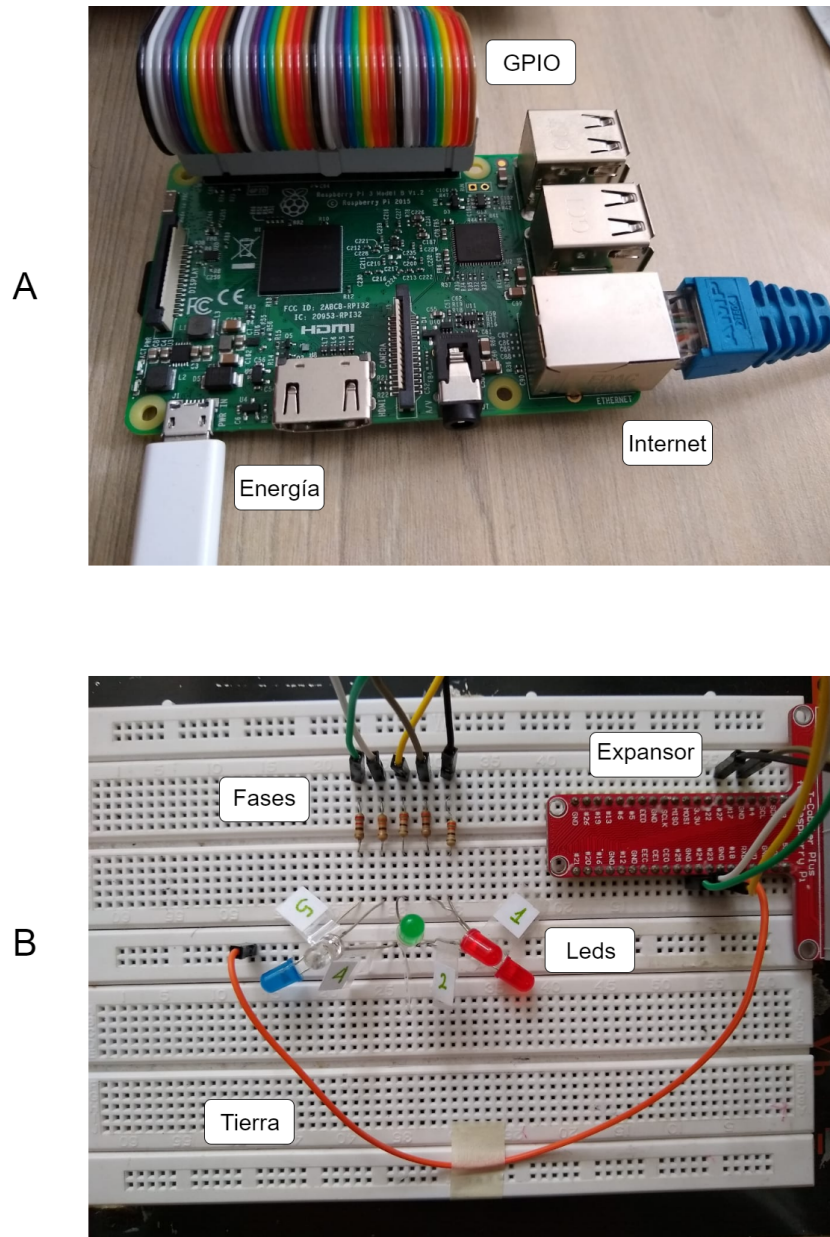


Figura 4.4: A. Implementación física de la Raspberry Pi B. Montaje de leds en protoboard.

Capítulo 5

Resultados

Tomando las ecuaciones planteadas en el capítulo 3, se aplica el modelo de optimización al caso específico de una electrolinera con 5 puntos de carga y una carga externa que es alimentada por el mismo transformador y se obtiene el siguiente modelo.

Función objetivo:

$$\max 0.33[1000P_1 + 1000P_2 + 600P_3 + 500P_4 + 600P_5] \quad (5.1)$$

Donde se desea maximizar los ingresos de la electrolinera. En esta ecuación, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 es la potencia que consume cada punto de carga. El factor que acompaña a cada potencia es el valor del kW/h para el respectivo punto de carga, que tendrá un valor de \$1000 para carga rápida (puntos 1 y 2), \$600 para carga convencional (puntos 3 y 5) y el punto 4 tendrá un precio de \$500 con la observación que de ser necesario apagar uno de los puntos de carga para satisfacer la demanda de la carga externa, este será el punto que deberá apagarse y el 0.33 equivale a 1/3 de hora (20 minutos), que es el intervalo en el que se presenta la toma de datos.

Restricciones:

$$\sum_{k=1}^5 P_k j_k + P_C \leq P_{trafo}(t) \quad (5.2)$$

$$P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_C \geq 0kW \quad (5.3)$$

5.1 Resultados para escenario ideal

Al no tener ninguna restricción o límite en potencia, se obtiene el máximo beneficio económico y siempre se puede satisfacer la demanda de la totalidad de los puntos sin que se vea afectada por el consumo de la carga externa.

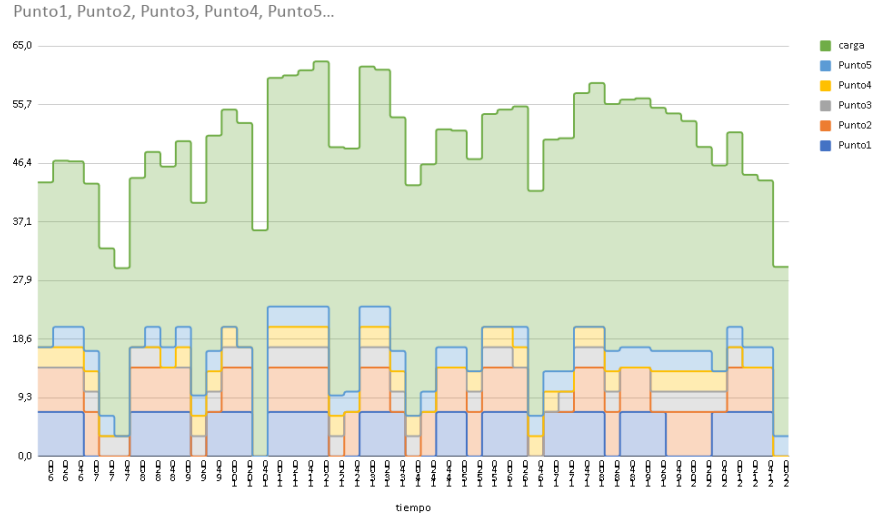


Figura 5.1: Respuesta a la demanda escenario ideal

En la figura 5.1 se observa que se satisface la demanda en todos los puntos de carga y también la carga externa, de esta forma en ningún instante de tiempo se hace necesario desactivar n puntos de carga para poder suplir la demanda prioritaria que es la externa a la electrolinera.

5.2 Resultados para escenario real

Habiendo integrado en el algoritmo de puntos de carga el modelo de optimización lineal con la función objetivo y las restricciones mencionadas en el capítulo 3, se presentan las siguientes imágenes con las respuestas a la demanda de cada uno de los puntos y su respectivo análisis.

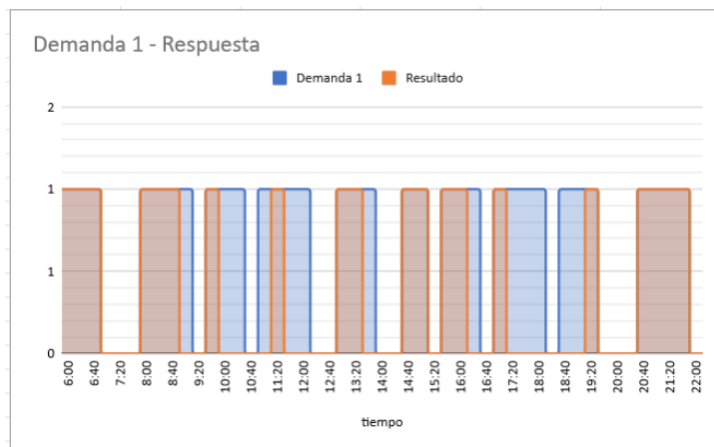
En las siguientes cinco gráficas se presenta una superposición de datos entre la cantidad de tiempo que se le solicitó a cada punto entregar energía a un vehículo (color azul) y la cantidad de tiempo en la que este pudo dar respuesta a esa demanda (color rojo).

Inspeccionando las gráficas, se puede apreciar que existen instantes en los que los puntos de carga no pueden cumplir con la demanda de los vehículos, esto se debe a la carga externa que también alimenta el transformador. Suplir

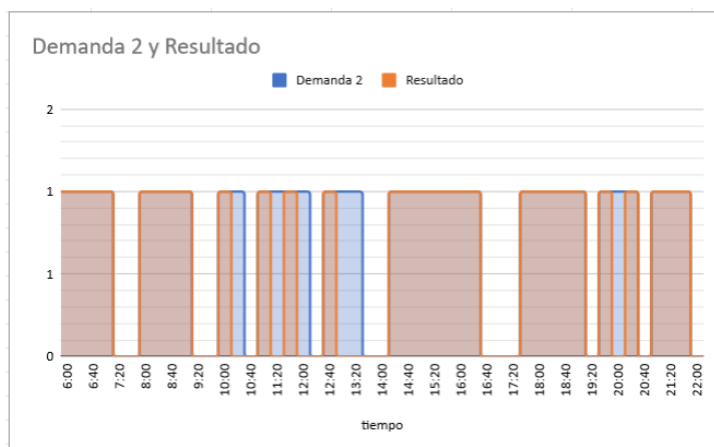
la potencia de dicha carga se ha tomado como prioridad, en comparación con la potencia que demandan los vehículos en la electrolinera. Esto se puede interpretar como la necesidad de ubicar un transformador o subestación de mayor potencia que la actual.

Recordando que la discretización se realizó cada veinte minutos, se dificulta observar en la gráfica qué instantes de tiempo marcan el cambio de vehículos en un punto, es decir, en qué momento un vehículo tomó el lugar de otro que ya cumplió su carga o se retiró del punto.

A



B



C



Figura 5.2: A. Respuesta a la demanda punto de carga 1 B. Respuesta a la demanda punto de carga 2 C. Respuesta a la demanda punto de carga 3

A



B

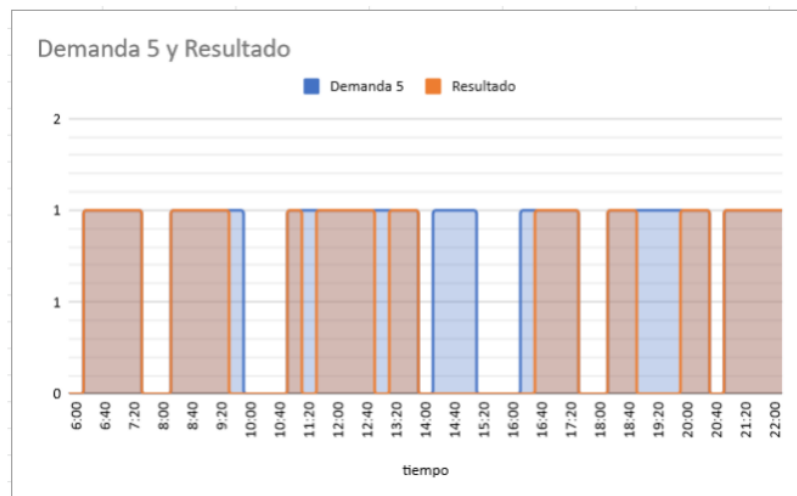


Figura 5.3: A. Respuesta a la demanda punto de carga 4 B. Respuesta a la demanda punto de carga 5

Tabla 5.1: Relación demanda - funcionamiento de los puntos de carga

Punto	Horas solicitado	Horas funcionamiento	% de funcionamiento
1	11,00	6,66	60,55
2	11,66	9,66	82,85
3	10,33	6,66	64,47
4	10,33	4,33	41,92
5	12,00	8,66	72,17

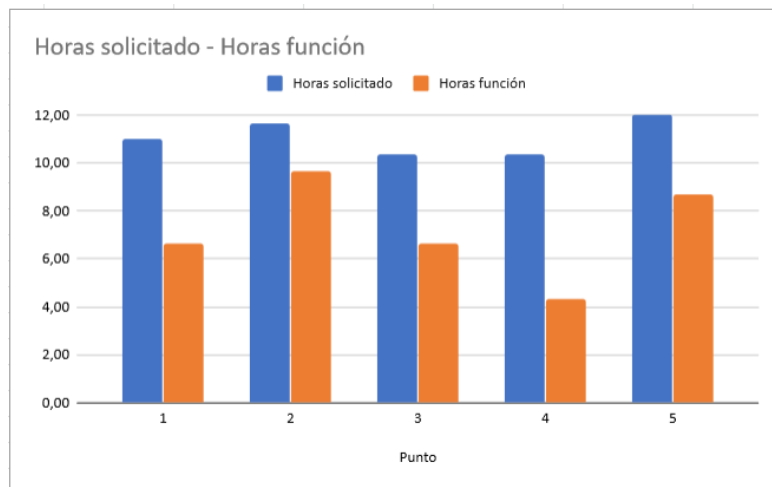


Figura 5.4: Representación gráfica de la tabla anterior

La representación gráfica de la tabla 5.1 indica el comportamiento de los puntos con la energía disponible, cuatro puntos responden a la demanda de los vehículos por encima de un 60%, aún así el punto número 4 presenta el peor desempeño, con un valor de 41.92%. Esto es debido a que el precio de recarga en este punto es inferior al de los demás, se puede concluir entonces, que ubicar un punto con precio reducido por la falta de disponibilidad de energía resulta ineficiente. Los vehículos que se conecten a este punto (motos y bicicletas) deberían tener al menos un 75% de batería para poder acceder a sólo veinte minutos de energía por cada hora que permanezcan conectados.

Los puntos de carga 1 y 2 tienen las mismas condiciones de funcionamiento y la respuesta a la demanda del punto 2 es mayor que la del punto 1, esto es decisión del “solver” elegido para este proyecto. Una de las sugerencias para la continuación de este trabajo, es la escalabilidad del mismo, por ejemplo implementarlo a cien puntos de carga, para este escenario se hace necesario establecer un tope máximo y un tope mínimo de funcionamiento de horas para cada punto, así la distribución de cargas será más homogénea entre los puntos que tienen las mismas características.

Capítulo 6

Conclusiones y futuros trabajos

6.1 Conclusiones

6.1.1 Para el escenario ideal

- Para el modelo de optimización en el escenario ideal, solo se requiere que las potencias sean mayores o iguales a cero. La energía disponible para alimentar los 5 puntos es ilimitada, lo cual hace despreciable la carga externa y los límites nunca serán alcanzados ni van a perjudicar la recarga de la electrolinera.
- Si se tiene una fuente de recarga infinita y conociendo que el valor de la tarifa para carga rápida, empleada en vehículos, es mayor que la tarifa para carga convencional, como prestador o comercializador del servicio será más rentable ofrecer más puntos de carga rápida para así obtener mayores ingresos.
- Como no se consideran restricciones y el modelo no está limitado, la Raspberry Pi trabaja de una manera eficiente y está en plena capacidad de satisfacer la demanda computacional de la electrolinera.

6.1.2 Para el escenario real

- A medida que el tiempo de toma de datos (potencia y actividad de cada punto) esté más discretizado, será más eficiente el sistema en el sentido de que los puntos estarán entregando carga durante un tiempo más específico, lo que generará mayor precisión en los ingresos.
- El escenario que se contempla en esta investigación es considerablemente pequeño en relación a la cantidad de puntos de carga, la escalabilidad

de este problema podrá llevarse a decenas de puntos de carga que estén ubicados, por ejemplo, en un centro comercial.

- En un escenario donde el tiempo de muestreo sea corto, usar la Raspberry pi no sería eficiente porque computacionalmente no está en la capacidad de abarcar tanta carga.
- Implementar puntos de carga con un costo de kW/h inferior a los de sus mismas características, tienen como consecuencia un alto índice de intermitencia, esto impide cargar baterías con porcentajes bajos de batería.

6.2 Futuros trabajos

Como propuesta para quien se interese por profundizar o mejorar este trabajo de investigación, los autores proponen dos ideas principales:

- Dentro de las fuentes de energía de la electrolinera se propone integrar fuentes de energía renovables como paneles solares fotovoltaicos y crear en el agregador eléctrico la capacidad de decidir en qué momento toma energía de la red y en qué momento usa la energía producida a través de los paneles.
- Crear un espacio en la interfaz del agregador, donde el usuario digite el número de cédula del titular del recibo de energía eléctrica de la casa donde este vive para que al recargar su vehículo no tenga que cancelar ahí mismo sino que el valor de su recarga le sea cobrado en la misma factura de la energía que consume en su hogar.

Capítulo 7

Anexos

7.1 Código del modelo de optimización

Con el fin de detallar el modelo de optimización implementado en el código en lenguaje Python, a continuación se añaden algunas de las líneas más importantes del código.

```
"""
Este programa obtiene los escenarios de los puntos de
carga para cada uno de los intervalos
establecidos en el
excel guardado con formato CSV y
optimiza la funcion obj planteada.
"""

import cvxpy as cp
import pandas as pd
import numpy as np

df = pd.read_excel("cargabilidad.xlsx", sheet_name=1)
dfc = pd.read_excel("cargabilidad.xlsx", sheet_name=0)

POTTRAFO = 50.0
x = len(df.iloc[0:])
punto1 = list(range(x))
punto2 = list(range(x))
punto3 = list(range(x))
punto4 = list(range(x))
punto5 = list(range(x))
diascarga = list(range(x))
```

```

for h in range(x):
    punto1[h] = df.iloc[h, 1]
for i in range(x):
    punto2[i] = df.iloc[i, 2]
for j in range(x):
    punto3[j] = df.iloc[j, 3]
for k in range(x):
    punto4[k] = df.iloc[k, 4]
for l in range(x):
    punto5[l] = df.iloc[l, 5]
for m in range(x):
    diascarga[m] = dfc.iloc[m, 1]

for p in range(x):
    if (punto1[p]==0)and (punto2[p]==0) and
    (punto3[p]==0) and (punto4[p]==0) and
    (punto5[p]==0):
        print("")
        print("TODOS_LOS_PUNTOS_ESTAN_APAGADOS")
        print("")
    else:
        k = [punto1[p], punto2[p],
        punto3[p], punto4[p], punto5[p]]
        j = cp.Variable(5, boolean=True)
        funcion = (1000*k[0]*j[0] + 1000*k[1]*j[1] +
        600*k[2]*j[2] + 500*k[3]*j[3] +
        600*k[4]*j[4]) * 0.33
        constrains = [j[0] * punto1[p] +
        j[1] * punto2[p] + j[2] * punto3[p] +
        j[3] * punto4[p] + j[4] * punto5[p] +
        diascarga[p] <= 50.0]
        obj = cp.Maximize(funcion)
        prob = cp.Problem(obj, constrains)
        prob.solve()

        print("Total ingreso o egreso por puntos
        .....de carga menos costo demanda: $", prob.value)
        print("")
        print("vector puntos encendidos y
        .....puntos apagados:", j.value)
        print("")

```

Bibliografía

- [1] C. Peng, J. Zou, L. Lian, and L. Li, “An optimal dispatching strategy for V2G aggregator participating in supplementary frequency regulation considering EV driving demand and aggregator ’ s benefits q,” *Applied Energy*, vol. 190, pp. 591–599, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.065>
- [2] K. Mahmud, G. E. Town, S. Morsalin, and M. J. Hossain, “Integration of electric vehicles and management in the internet of energy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no. October 2016, pp. 4179–4203, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.11.004>
- [3] X. Lin, J. Sun, S. Ai, X. Xiong, Y. Wan, and D. Yang, “Electrical Power and Energy Systems Distribution network planning integrating charging stations of electric vehicle with V2G,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 63, pp. 507–512, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.043>
- [4] A. M. Ghazvini and J. Olamaei, “Optimal sizing of autonomous hybrid PV system with considerations for V2G parking lot as controllable load based on a heuristic optimization algorithm,” *Solar Energy*, vol. 184, no. December 2018, pp. 30–39, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.087>
- [5] O. J. E. carro colombiano Restrepo, “Lo que usted debe saber sobre carros eléctricos en Colombia: Costos, beneficios y algo más,” 2018. [Online]. Available: <https://www.elcarrocolombiano.com/notas-de-interes/lo-que-usted-debe-saber-sobre-carros-electricos-en-colombia-costos-beneficios-y-algo-mas/>
- [6] Revista Portafolio, “Colombia lidera el mercado de vehículos eléctricos en la región — Economía — Portafolio,” 2019. [Online]. Available: <https://www.portafolio.co/economia/colombia-lidera-el-mercado-de-vehiculos-electricos-en-la-region-531242>
- [7] Ministerio de Comercio Industria y Turismo, “DECRETO 1116 DE 2017.” [Online]. Available: <http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO1116DEL29DEJUNIO2017.pdf>

-
- [8] Congreso de Colombia, “Ley 1964 de 2019,” Tech. Rep., 2019.
- [9] Empresa de Energía de Pereira, “Catálogo MEEP 2019,” 2019. [Online]. Available: <http://www.eep.com.co/images/Catalogo{-}MEEP{-}2019.pdf>
- [10] “BMW X5: SUV con BMW xDrive.” [Online]. Available: <https://www.bmw.com.co/es/all-models/x-series/X5/2018/bmw-x5-inicio.html>
- [11] M. Guarnieri and M. Guarnieri, “Looking back to electric cars,” in *2012 Third IEEE HISTory of ELECTro-technology CONFerence (HISTELCON)*. IEEE, sep 2012, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6487583/>
- [12] E. de Aragón, “Qué necesito saber sobre modos y tipos de carga de un vehículo eléctrico,” 2018. [Online]. Available: <https://movilidadelectrica.com/modos-y-tipos-de-carga-de-un-vehiculo-electrico/>
- [13] Empresa de Energía de Pereira, “La primera electrolinera del país está en Pereira.” [Online]. Available: <http://www.eep.com.co/noticias/821-la-primer-electrolinera-del-pais-esta-en-pereira>
- [14] R. J. Bessa and M. A. Matos, “The role of an aggregator agent for EV in the electricity market,” no. November, pp. 1–9, 2010.
- [15] R. Velasco, “Análisis: Raspberry Pi 3 Modelo B+ - HardZone,” 2018. [Online]. Available: <https://hardzone.es/reviews/perifericos/analisis-raspberry-pi-3-modelo-b/>
- [16] R. Guzmán, “Electrónica y ciencia: Conexión GPIO de Raspberry Pi 3.” [Online]. Available: <http://electronicayciencia.blogspot.com/2016/11/conexion-gpio-de-raspberry-pi-3.html>
- [17] P. Halcartegaray, “Qué es un modelo de optimización? — Blog - Notus,” 2018. [Online]. Available: <https://blog.notus.cl/que-es-un-modelo-de-optimizacion/>
- [18] A. Ramos, P. Sánchez, J. M. Ferrer, J. Barquín, and P. Linares, “MODELOS MATEMÁTICOS DE OPTIMIZACIÓN,” Tech. Rep., 2010.
- [19] “Welcome to CVXPY 1.0 — CVXPY 1.1.0a1 documentation.” [Online]. Available: <https://www.cvxpy.org/>
- [20] “Advanced Features — CVXPY 1.1.0a1 documentation.” [Online]. Available: <https://www.cvxpy.org/tutorial/advanced/index.html>
- [21] “GitHub - embotech/ecos: A lightweight conic solver for second-order cone programming.” [Online]. Available: <https://github.com/embotech/ecos{#}mixed-integer-socps-ecos{-}bb>